فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال پنجم/ شماره ۱۴/ بهار ۱۳۹۸/ صفحات ۱۹۵-۱۶۹

ارزیابی فنی، اقتصادی، زیست محیطی تولید برق از زباله‌های جامد شهری: مطالعه موردی مشهد

رستم صابری‌فر
دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
(نویسنده مسئول)
r_saberifar@pnu.ac.ir
علی شکرگزار عباسی
استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
shokgozar.a@pnum.ac.ir

هدف این پژوهش، ارزیابی امکان تولید انرژی از زباله و کاهش پیامدهای ناشی از دفع غیر اصولی مواد زاید در شهر مشهد بود. یافته‌ها نشان داد که در بین پنج واریانت مورد ارزیابی، واریانت شماره ۵ که بالاترین راندمان انرژی، پایین‌ترین هزینه و کمترین تولید گازهای گلخانه‌ای را بدست می‌آورد، در این شهر قابل اجراست. بر این اساس، می‌توان در اولین اقدام، یک نیروگاه ۱۲۰۰ کیلوواتی برای شهر مشهد پیشنهاد نمود تا از این طریق بتواند قریب به ۱۵۰ تن زباله را به صورت روزانه تبدیل نماید. هزینه برآوردی برای راه‌اندازی این تاسیسات، حدود ۱۵ میلیارد تومان می‌باشد. این هزینه در طی کمتر از ۵ سال مستهلک شده و به سوددهی خالص خواهد رسید. آنالیز حساسیت به وسیله پارامتر نرخ بازده داخلی(IRR) نشان داد که با کاهش ۴ درصد از درآمد فروش، میزان IRR به ۲۰/۹۳ درصد می‌رسد. همین‌طور با ۴ درصد کاهش در دارایی‌های ثابت و هزینه عملیاتی، نرخ بازده داخلی به ترتیب به ۲۳/۱۳ درصد و ۲۲/۷۸ درصد خواهد رسید.

واژگان کلیدی: مدیریت زباله، تولید انرژی، گاز متان، شهر مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱/۳۱

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

۱. مقدمه

هم‌اکنون مدیریت زباله، به یکی از مهم‌ترین موضوعات محیط زیستی در سطح جهان تبدیل شده‌است. به خصوص در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، روش‌های معمول دفع پسماند شهری منجر به بروز بسیاری از مشکلات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی شده‌است و از این‌رو، شناسایی راهکار بهینه برای مدیریت صحیح پسماند شهری، از مهم‌ترین اهداف کشورها می‌باشد(امین‌صالحی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۲۳). اما تاکنون تمامی سعی مدیران شهری، جمع-آوری و دفن زباله‌های شهری بوده و کمتر به بهره‌مندی اقتصادی از این مواد، توجه داشته‌اند. به طوری که هم اکنون ۸۰ درصد کل هزینه مدیریت پسماند مربوط به جمع‌آوری و از این مقدار، ۶۰ درصد به هزینه دستمزد و حقوق کارگران مربوط می‌شود(مجلسی و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۷). در ایران نیز پس از تصویب قانون مدیریت پسماند در سال ۱۳۸۳، تلاش‌هایی در جهت ساماندهی این حوزه بسیار مهم آغاز شده‌است. به طوری که اکنون تکنولوژی‌های جدید، این امکان را در اختیار قرار داده‌است تا ضمن بهره‌مندی اقتصادی حداکثری از این مواد، حداقل آلودگی از آنها منتشر شود. مطابق بررسی‌های میدانی، هزینه دفن بهداشتی زباله‌ها دقیقا معادل استحصال گاز از آنهاست که می‌تواند به مصرف سوخت و یا تولید برق برسد(Saberifar et al., 2008: 45). تجربه برخی از نیروگاه‌های تولید برق از زباله از جمله شیراز، این ادعا را تایید نمود.

تبدیل زباله به انرژی و بهره‌وری اقتصادی، از جمله راهکارهای مفید و نوآورانه‌ای است که به شدت مورد توجه مدیران و حتی مردم عادی قرارگرفته‌است. چرا که دستیابی به انرژی‌های قابل تجدید، از آرزوهای همیشگی بشر بوده‌است(استازاد، ۱۳۹۲: ۲). برای تبدیل زباله‌های جامد به انرژی، دو رویکرد اساسی وجود دارد. اول، سوزاندن و بهره‌برداری مستقیم از انرژی زباله‌های جامد و دیگری، بهره‌وری از شیوه‌های شیمیایی و تولید گاز. روش اخیرالذکر تاکنون تنها در اختیار سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بوده‌است(مهربانی و همکاران، ۱۳۹۲). به هر حال،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

هر یک از این شیوه‌ها، برای زباله‌های ویژه‌ای قابل استفاده هستند. به عنوان مثال، سوزاندن تنها در مورد زباله‌هایی مطرح می‌باشد که کاربرد روش‌های میکروبی و بیولوژیکی در مورد آنها غیر ممکن بوده(مانند زباله‌های بیمارستانی) و یا میزان رطوبت آنها اندک است. با وجودآن که این روش مشکلات و تنگناهای خاص خود را دارد، اما حذف و یا تقلیل زباله‌های جامد شهری به این نحو، ضمن آن که فضای لازم برای دفن را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد، از انرژی تولید شده به این روش می‌توان بهره‌برداری نمود. به عنوان مثال، کشور مالزی با یک کارخانه‌ی مجهز به دستگاه‌های زباله سوز، توانسته است ۱ مگاوات برق را از هر ۱۰۰ تن زباله‌ی جامد شهری، تولید نماید(Yip and Chau, 2008: 301).

اما واقعیت آن است که در شرایط کنونی، بیشتر زباله‌های تولیدی در ایران و بسیاری از کشورهای در حال توسعه، بدون هیچ استفاده‌ای، دفن می‌شوند و این عامل در مناطقی که با مشکلات محیطی روبرو هستند؛ به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده‌است. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای در شهر مشهد، مشخص گردید که شیرابه‌های تولیدی از مراحل مختلف فرآوری زباله‌های شهری از نظر غلظت مواد آلی در زمره فاضلاب‌های بسیار قوی محسوب می‌گردد(دانش و همکاران، ۱۳۸۵: ۹). اهمیت این شرایط وقتی آشکار می‌شود که بدانیم، محل‌های دفن با کمترین حفاظت و کنترلی روبرو می‌باشند. به طوری که در سال ۱۳۹۰، تقریبا ۱۳۰۰ محل دفن و دپوی زباله در ایران وجود داشته‌است که تنها ۳۰ درصد از این مکان‌ها، حداقل استانداردهای بهداشتی و زیستی را رعایت کرده بودند. این حجم بالا از محل‌های دفن و مشکلات ناشی از آن، می‌تواند به عنوان مشوقی برای بهره‌مندی از روش‌های کم هزینه بازیافت و تبدیل مواد زائد شهری باشد. در شهر مشهد که موضوع این تحقیق است، بسیاری از شیوه‌های اشاره شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما به نظر می‌رسد نتایج مورد انتظار کسب نشده و با توجه به زباله تولیدی و پیش‌بینی روندهای آتی، با واقعیت‌های موجود سازگار نیست. به همین منظور، این تحقیق با استفاده از نمونه‌ای از زباله‌های تولیدی در ۱۵۶ محله شهر مشهد و با بهره-برداری از روش‌های آزمایشگاهی و تجربی به انجام رسید تا مسئولین بتوانند با مقایسه این نتایج،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

با آنچه در محل‌های بازیافت این کلان شهر صورت می‌گیرد، تغییرات لازم را در روش‌ها و سیستم‌های مورد استفاده، اعمال نمایند.

۲. پیشینه نظری

با وجود آن که تحقیقات مربوط به مدیریت، دفع و دفن زباله در جهان بسیار متعدد و پردامنه می-باشد، حجم تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با تولید انرژی از خورشید، باد، آب، زمین‌گرمایی(قائدی‌راد و شاهین، ۱۳۹۵: ۹۷) و به خصوص زباله، بسیار اندک و نادر است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در ایران تحقیقات صورت گرفته اغلب توصیفی بوده و کمتر به راهکارهایی منجر شده‌است که قابلیت اجرا داشته باشد. به طوری که اغلب روزنامه نگاران و خبرنگاران صدا و سیما ابتدا به این موضوع توجه داشته و مطالب نه چندان جدی را منتشر نمودند. به عنوان مثال، نعمتی و همکاران(۱۳۹۳)، در یک بررسی با عنوان بازیابی انرژی از زباله، صرفا به روش‌های متداول و مزایا و مضرات هر یک از آنها توجه نموده‌اند. این روند، در کارهای جلیلوند و همکاران(۱۳۹۱) و رضاپور(۱۳۹۴) هم ادامه پیدا کرد. البته، قلی‌زاده و رهنما(۱۳۹۴) نیز به شکل غیر مستقیم به تولید انرژی از زباله اشاره کرده‌اند.

بررسی‌های خارجی در این حوزه نیز بسیارند. یکی از اولین‌ها، کار جوهاری و همکاران (۲۰۱۲) می‌باشد. این گروه، نشان دادند که میزان گاز متان تولیدی در هر سال برای کشور مالزی، ۳۱۰۲۰۲ تن می‌باشد که از این طریق می‌توان ۱/۹ میلیارد کیلووات ساعت، برق به دست-آورد. پژوهش مشابه دیگری توسط نور و همکاران (۲۰۱۳) به انجام رسید. در این تحقیق، مشخص گردید که گاز حاصل از زباله‌های دفن شده، می‌تواند منبع انرژی مهمی محسوب شده و حدود ۱/۵ درصد انرژی مورد نیاز را تأمین نماید. کلانتری‌فرد و گل (۲۰۱۱)، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زباله‌های جامد شهری و اثر آنها بر تبدیل انرژی را بررسی کرده و نشان دادند که این مواد، ارزش گرمایی بالایی در حدود ۲۳۰۰۰ کیلو ژول دارند. این وضعیت در کارهای جسوانی و آزاپاجیک۲(۲۰۱۶)؛ آلمیدیا و فریرا (۲۱۷)؛ امری(۲۰۱۷)؛ هوارد و همکاران(۲۱۰۸)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

و سلوس و همکاران(۲۰۱۸)، پیگیری شد و مشخص گردید که از هر تن زباله می‌توان ۲۶۰۰ کیلووات ساعت برق(در دانمارک) و از تفاله ناشی از این روند، برای هر تن، مواد اولیه آسفالت به قیمت ۷۰ دلار به دست آورد. دولت ترکیه نیز اعلام کرده‌است که هر کیلووات برق حاصل از این طریق را تا قیمت ۱۸۰ دلار خریدار است. محاسبات مربوط به ایران نیز نشانگر آن است که در صورت آماده‌سازی شرایط لازم، در برخی از شهرها چون تهران، شهرداری قادر است هر روز ۲ میلیارد و ۱۱۶ میلیون و ۴۰۰ هزار تومان برق به‌فروش برساند. به همین دلیل، ضرورت داشت تا این روند برای برخی از کلان‌شهرها از جمله مشهد نیز مورد توجه قرارگیرد. چرا که در حال حاضر، میزان زباله تولیدی روزانه در ایران از مرز ۲۰ میلیون تن گذشته و تولید سرانه آن ۷۰۰ گرم در روزاست. در شهر مشهد نیز در سال ۱۳۹۶ روزانه ۲۳۵۰ تن زباله تولید شده‌است که سرانه هر شهروند مشهدی در این ارتباط، قریب به ۷۵۰ گرم برآورد می‌گردد. مطابق پیش‌بینی‌ها و بر اساس افزایش نیم درصدی زباله در هر سال، احتمالا میزان زباله تولیدی در شهر مشهد طی ۱۰ سال آینده به بیش از ۳۵۰۰ تن خواهد رسید. هم اکنون ترکیب زباله‌های جامد شهری مشهد مطابق جدول شماره ۱ می‌باشد. زباله‌های جامد شهری در مشهد، بر اساس میزان رطوبت، در حد متوسط ارزیابی شده و این امر نشانگر آن است که می‌توان برای بازیافت آن، از روش‌های کم هزینه‌تر هم بهره‌برداری نمود. در مجموع، حدود ۱۱ درصد کل زباله تولیدی در مشهد به صورت تفکیک از مبدا جمع‌آوری می‌شود. علاوه بر آن، حدود ۱۸ درصد کل زباله به صورت تفکیک در مقصد(کارخانه‌های پردازش مجتمع‌های صنعتی بازیافت ۱ و ۲ کنونی) جداسازی می‌گردد.

در نهایت، حدود ۱۵ درصد از کل زباله تولیدی در کارخانه کمپوست مجتمع بازیافت شماره ۱، به کمپوست تبدیل می‌گردد. محصول خروجی از مجتمع اخیرالذکر حدود ۶۰ تن کود است که به فروش می‌رسد. بر این اساس، می‌توان عنوان داشت که از کل زباله تولیدی در شهر مشهد، ۷۲ درصد در محل‌های دپوی فعلی، دفن می‌شوند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۱. ترکیب زباله های شهری، نمونه انتخابی

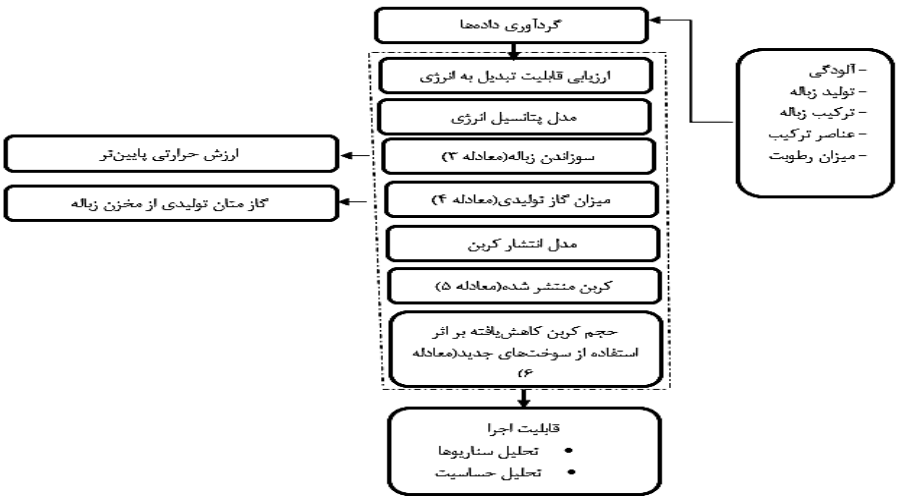
ردیف	شرح	مواد غذایی	اثاثیه	کاغذ	پلاستیک	شیشه	فلز	پارچه
۱	وزن	٪۵۵	٪۲	٪۱۵	٪۱۸	٪۳	٪۱	٪۶
۲	رطوبت	٪۳۷	٪۱	٪۱۳	٪۱	۰	۰	٪۱
۳	وزن	٪۳۴	٪۲	٪۱۳	٪۱۸	٪۳	٪۱	٪۶
۴	کربن ارگانیک	۴۸	۴۸	۴۴	۰	۰	۰	۵۵
۵	کربن غیرارگانیک	۰	۰	۰	۶۰	/۵	۴/۵	۰
۶	هیدروژن	۶/۴	۶	۶	۲۲/۸	/۱۰	/۶۰	۶/۶۰
۷	اکسیژن	۳۷/۶۰	۳۸	۴۴	۷/۲۰	/۴	۴/۳۰	۲۱/۲۰
۸	نیتروژن	/۴۰	/۳۰	/۲۰	/۱۰	۰	۰	/۱۰
۹	سولفور	۲/۶	۳/۴۰	/۳۰	۰	/۱۰	۰	۹۰/۵۰
۱۰	خاکستر	۵	۴/۵۰	۶	۱۰	۸۹/۹۰	۰/۴۶	۲/۵۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۳. روش تحقیق و تحلیل

روش انجام این تحقیق توصیفی و تحلیلی بوده و اطلاعات مورد نیاز از اسناد و مدارک کتابخانه-ای و همچنین مصاحبه با ۱۱۲ نفر از کارشناسان ذی‌صلاح در کل کشور گردآوری شد. کارشناسان مورد پرسش به شیوه نمونه‌گیری در دسترس انتخاب شده و از آنها به شیوه مصاحبه اکتشافی نظرسنجی شد. برای بررسی کمیت و کیفیت زباله‌های تولیدی در شهر مشهد نیز نمونه-ای به حجم ۱۵۶۰ مورد از زباله‌های تولیدی در خانوارها و واحدهای تولیدی در محلات شهر مشهد(از هر محله ۱۰ نمونه) انتخاب و مورد بررسی قرارگرفت. داده‌های گردآوری شده در این تحقیق، با استفاده از نرم افزارهای SPSS و Comfar و الگوی مفهومی ارائه‌شده در شکل ۱، تجزیه و تحلیل گردید. هدف اصلی آن بود که میزان تولید انرژی در روش سوزاندن و تولید گاز مورد مقایسه قرارگرفته و امتیازات و کاستی‌های آنها مشخص گردد. در مرحله بعدی، قابلیت این روش‌ها در زمینه کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای و امکان تولید برق از روش‌های مورد اشاره و همچنین هزینه- فایده آنها، ارزیابی شد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]



شکل۱. الگوی مفهومی تحقیق

در مبحث تولید برق از زباله‌های جامد، اولین سئله تعیین تکنولوژی مورد استفاده است. در بین روش‌های مختلف، آر.دی. اف، هاضم بی‌هوازی، گاز لندفیل، زباله سوز توده سوز و زباله سوز بستر سیال، در ایران قابلیت اجرایی دارند. در بین روش‌های تولید انرژی، دفن بهداشتی و تولید برق و حرارت و یا تزریق گاز به شبکه گازرسانی به عنوان پرکاربردترین و ارزان ترین روش و پلاسما و زباله سوز، به عنوان گرانترین فناوری‌های تولید انرژی از پسماند شهری مطرح هستند(نصیری، ۱۳۸۶: ۸۷). اما از آنجا که تمامی روش‌های مورد اشاره به زمین وسیعی برای استقرار تجهیزات نیازمند بوده و در مناطق شهری از جمله مشهد، این محدودیت بسیاری از شرایط تحت الشعاع قرار می‌دهد، در این بررسی، زباله سوز، اولویت بالاتری را به خود اختصاص می‌دهد. با این وجود باید یادآوری نمود که بررسی‌های اولیه نشانگر آن است که هزینه سیستم پلاسما برای یک مجموعه ۴۰۰ تنی در حدود ۶۰ میلیون دلار می‌باشد و قادراست از محل فروش برق به شبکه سالانه ۵/۵۸ میلیارد دلار درآمد به دست دهد. اما این هزینه برای زباله سوز از نوع مدولی و یا آر اف دی برای سیستمی با ورودی ۱۰۰۰ تن در روز که ۳۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

مگاوات ظرفیت آن باشد، ۱۵۰ میلیارد تومان برآورد می شود. ارزش برق تولیدی قابل فروش سالانه ۱۴/۸۸ میلیارد تومان خواهد بود. این شرایط برای هزینه دفنگاه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. چنانچه ظرفیت این نیروگاه را حداکثر ۱ مگاوات بازای هر ۱ میلیون تن زباله در نظر بگیریم، درآمد حاصل از این طریق ۴۹۶ میلیون تومان در سال به ازای هر یک مگاوات ساعت می‌باشد(برای اطلاع نگاه کنید به نصیری، ۱۳۸۶: ۸۲).

به طور معمول، در مبحث خصوصیات فیزیکی زباله‌های جامد مواردی چون ترکیب، رطوبت، حجم، وزن و ... بررسی می‌شود. در بخش خصوصیات شیمیایی، ترکیبات مولکولی بر حسب کربن ارگانیک، کربن غیرارگانیک، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و خاکستر تعیین می گردد. تنها مطالعه‌ای که در ایران به بررسی ترکیب شیمیایی زباله اقدام نموده‌است، بررسی ملکوتی(۱۳۷۸) می‌باشد که تنها به برخی از پارامترهای مورد اشاره، توجه نموده‌است. به عنوان نمونه در این بررسی، میزان کربن‌آلی بین ۲۸ تا ۳۴ درصد برآورد شده‌است(ملکوتی، ۱۳۷۸: ۲). اما در بررسی حاضر برای تعیین میزان تولید انرژی و یا سایر مواد بازیافتی از زباله، ابتدا وزن زباله خشک تولیدی محاسبه گردید و به این منظور از معادله شماره ۱ استفاده شد(Oh et al., 2010):

(۱) وزن زباله خشک(٪) = وزن زباله تر (٪) × (میزان رطوبت (٪) − ۱۰۰)

در صورت وجود تاسیسات و تجهیزات لازم در این روند، گرما با استفاده از چرخه‌ی رانکین، در توربین بخار مورد بهره‌برداری قرارگرفته و برق تولید می‌شود. واکنش شیمیایی کلی سوختن زباله، تحت شرایط ایده‌آل را می‌توان با معادله‌ی شماره ۲ تشریح نمود(Tchnobanoglous et al., 1993):

$$Organic\ Matter + Excess\ Air = N2 + CO2 + H2O + O2 + Ash + Heat \quad (۲)$$

میزان انرژی حاصل از سوزاندن زباله‌های جامد شهری، به وسیله‌ی میزان انرژی زباله با ارزش گرمازایی، نشان داده می‌شود. در این پژوهش، میزان انرژی تقریبی زباله‌های شهری با استفاده از تقارن ریاضی معادله‌ی تعدیل شده‌ی دولانگ(معادله ۳) محاسبه‌شده‌است(Ibid). از

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

آنجا که میزان رطوبت زباله‌های جامد شهری، از مهم‌ترین متغیرها در تعیین میزان انرژی حاصل از زباله‌هاست، توجه به این عامل بسیار حیاتی بوده و بایستی این مقدار نیز تعیین و کنترل گردد.

$$Energy\ Content\ (LHV) = [7831XCorg + 35932\ (XH2 - XO2/18) + 2212XS - 354XCiorg + 1187XO2 + 578XN2] \times (100 - MC) \quad (۳)$$

که در این معادله LHV میزان انرژی بر پایه‌ی کیلوکالری؛ X، وزن زباله(تر)؛ Corg، کربن ارگانیک؛ Ciorg، کربن غیرارگانیک، H، هیدروژن؛ O، اکسیژن؛ N، نیتروژن؛ S، گوگرد و MC میزان رطوبت می‌باشد. محاسبات نگارنده نشانگر آن است که با این روش، نیروگاه آرادکوه می‌تواند روزانه با ۲۰۰ تن زباله، حدود ۲ مگاوات برق تولید نماید و این میزان برق قادر است نیاز ۱۳۰۰ خانوار را برآورده‌سازد.

گاز اصلی متصاعد شده از مخازن دفن زباله، متان (CH_4) است. مطالعات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که میزان تولید گاز متان بین ۰/۲۱ تا ۰/۶۵ مترمکعب به ازای هر کیلوگرم زباله فسادپذیر متغیر است(کرباسی و باغوند، ۱۳۸۱). به هر حال، حدود ۵۳ درصد از گاز تولیدی از مخازن دفن، متان و بقیه کربن دی‌اکسید و سایر گازها می‌باشد. گاز متان نتیجه تجزیه بی‌هوازی زباله‌های ارگانیک است. به طور معمول، میزان گاز متان تولیدشده از این مواد با استفاده از معادله ۴ قابل محاسبه است(Oh et al., 2010):

$$\text{CH4emission from landfill} = \sum_j MSW \times WFj \times MCF \times DOCj \times DOCF \times F \times Y \quad (۴)$$

که در این معادله MSW، کل زباله موجود؛ WFJ، میزان زباله غیرقابل بازیافت و Y، ضریب تبدیل(کربن به متان) است که برابر با ۱۶/۲ می‌باشد. محاسبات صورت گرفته نشانگر آن است که در صورت دفن کامل پسماندهای تولیدی در شهر مشهد، می توان هر ساعت حدود ۱۸۲۷ مترمکعب گاز تولید نمود.

با توجه به مطالب فوق، اگر قرار باشد میزان گاز متان حاصل از پسماندهای غذایی را محاسبه نماییم، می‌توانیم به شکل یک مثال، محاسبه‌ای برای نشر متان (CH_4) برای پسماند مواد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

غذایی دفن‌شده (WF=0/03) در سال ۱۳۹۶ (ضریب تبدیل انرژی به روش سوزاندان در این سال معادل ۸/۱۹ در نظر گرفته شده‌است) را بر اساس معادله‌ی ۴، انجام دهیم:

$$CH4\ emission = (8.19)(0.03) \times (0.4) \times (0.48) \times (0.77) \times (0.55) \times (16/12) = 0/027$$

در روند سوختن زباله، انرژی شیمیایی موجود، به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. از این فرایند می‌توان بخشی از انرژی مورد نیاز را که هم اکنون با استفاده از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود، فراهم آورد. این فرایند و یا استفاده از گاز متان حاصل از زباله‌ها، بخش قابل ملاحظه‌ای از سوخت‌های فسیلی را از گردونه مصرف خارج می‌سازد. اما مشکل اصلی آن است که در این فرایند، کربن موجود به کربن دی اکسید(CO_2) و کربن بیوژنی، تبدیل می‌شود. این در حالی است که علاوه بر کربن دی‌اکسید، مقداری نیتروژن و متان نیز تولید شده که وارد جو می‌گردد(جدول ۲). بنابراین، این فرایند نیز می‌تواند میزان انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای را افزایش دهد که این حجم گاز منتشر شده را می‌توان با استفاده از معادله ۵، محاسبه نمود(Tchnobanoglous et al., 1993):

$$\text{CO}_2 \text{ emission from plastic waste} = \sum_j (WF_j\, C_{iorgj} \times OF_j) \times Z \qquad (۵)$$

در این معادله، میزان انتشار CO2 بر حسب تن بوده و Wfj برابر با سهم زباله برای ترکیب j بر حسب جرم خشک؛ Ciorg، برابر با سهم کربن بر حسب جرم خشک ترکیبات j؛ OFJ، برابر با عامل اکسیداسیون؛ Z هم عامل تبدیل برابر $\left(\frac{44}{12}\right)$ و j برابر با زباله‌های جامد شهری است که سوزانده شده‌است. به عنوان مثال، برای تعیین میزان کربن دی اکسید از پسماندهای پلاستیکی سوخته شده در شهر مشهد، طی یک‌سال مشخص(۱۳۹۶)، روند کار چنین خواهد بود:

$$\text{CO}_2 \text{ emission from plastic waste} = 0.03 \times 0.03 \times 1 \times \left(\frac{44}{12}\right) = 0.55$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۲. وضعیت تبدیل زباله جامد شهری به انرژی برای پارامترهای مختلف

پارامتر	شرح	مقدار
سوزاندن	مقدار انرژی حاصل از سوزاندن مستقیم زباله(کیلو ژول)	۷/۵۳
	ضریب گرمای تبدیلی(٪)	۸۰
	نرخ گرما(GJ/MW h)	۱۵/۶۵
	نرخ تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی(Mwh/t)	۰/۴۸۱
	کربن دی اکسید ناشی از سوزاندن زباله(tCO2/t)	۰/۴۹
	ساعات فعالیت	۲۴
گازهای منتشره	متان(tCH4/t)	۰/۰۵۳
	دی اکسید کربن(tCO2/t)	۱/۱۱
	متان تولید شده از روند عملیات تولید گاز (٪)	۵۵
	ارزش حراراتی پایین‌تر از روند عملیات تولید گاز(MJ/m^3)	۱۷
	دی اکسید کربن حذف شده بر اثر جایگزینی سوختها(tCO2/KWH)	۰/۰۰۰۶۱۹
	قیمت برق تولیدی(کیلووات ساعت/تومان)(قیمت برق برای تکنولوژی‌های مختلف فرق می‌کند؛ اما در ایران و مطابق مصوبه وزارت نیرو در سال ۱۳۹۵، برق حاصل از زباله سوزها به ازای هر کیلووات ساعت حدود ۳۷۰۰ ریال و برای برق ناشی از گاز لندفیل معادل ۲۷۰۰ تعیین شدهاست). البته برق صادراتی به ترکیه هر کیلووات ۱۸۰ دلار می باشد.	۳۲۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که قبل از این بیان شد، زباله‌های جامد شهری را می‌توان به طور مستقیم سوزانده و به انرژی تبدیل نمود و یا با دفن آنها، گاز متان حاصله را به مصرف رساند. این دو منبع، می‌توانند بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی مورد نیاز شهرها را تامین نموده و در نتیجه، ضرورت مصرف سوخت‌های فسیلی از بین خواهدرفت. از آنجا که سوخت‌های فسیلی سهم قابل ملاحظه‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند، با حذف این نوع سوخت، تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کاهش می‌یابد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

٤. نتایج و بحث

از آنجا که در ایران در زمینه مدیریت پسماندهای شهری مطالعات اندکی صورت‌گرفته و این بررسی‌ها نیز عمدتا در قالب روش‌های توصیفی به انجام رسیده‌بود، در مطالعه حاضر به روش مصاحبه‌اکتشافی نقطه نظرات کارشناسان و متخصصان این حوزه‌گردآوری شد. این افراد که اغلب در سمت‌های مدیریتی و تحقیقاتی شاغل به کار بوده و تجربیات ارزنده داشتند، همگی بر ضرورت انجام مطالعه‌ای که بتواند زباله‌های شهری را با بهره‌مندی اقتصادی مناسب مدیریت نماید، تاکید داشتند. بعد از تعیین ضرورت انجام مطالعه، از گروه مورد پرسش تقاضا شد تا شیوه‌های پیشنهادی خود را برای ساماندهی پسماندهای جامد اعلام نمایند. با وجود آن که حدود ۱۰ درصد از شرکت کنندگان به تهیه کمپوست اشاره داشتند، سایرین، به تولید گاز از این مواد توجه نشان داده و گزینه‌تولید برق از زباله‌ها، بالاترین فراوانی را به دست آورد. در مرحله بعدی، از گروه درخواست شد تا حجم نمونه مورد نیاز برای ارزیابی زباله‌های شهری را اعلام نمایند. در نهایت مشخص گردید که انتخاب ۱۰ نمونه از هر یک از محلات شهر مشهد، برای این منظور، مناسب است. سوال اساسی دیگری که از شرکت کنندگان در این بررسی پرسیده شد آن بود که داده‌های مورد نظر با کدام یک از نرم‌افزارهای مورد تجزیه و تحلیل قرارگیرد. مطابق اعلام این افراد، دو نرم‌افزار معرفی شده در بخش روش تحقیق برای این منظور پیشنهاد و مورد تایید قرارگرفت. در نهایت در کنار محاسبات صورت گرفته، نقطه نظرات این گروه نیز برای اولویت-بندی گزینه‌ها مورد بهره‌برداری قرارگرفت.

با توجه به اعلام شرکت کنندگان در بررسی و محاسبات صورت‌گرفته، مشخص گردید که می-توان بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی مورد نیاز شهرها را که هم اکنون از طریق سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید، با استفاده از سوزاندن مستقیم زباله‌های جامد شهری و یا استحصال گاز متان و مصرف آن در تولید برق، تامین نمود. به این منظور، روش‌های مختلف تحلیل معرفی شده و بر آن اساس، شیوه‌های تامین انرژی مورد بحث و بررسی قرارگرفت. در ادامه، چشم‌انداز تولید انرژی در شهر مشهد مطرح گردید و مشخص شد که میزان تولید انرژی در این بخش قابل ملاحظه بوده و این در حالی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

است که با توجه به واریانت‌های خاص می‌توان علاوه بر بهره‌مندی‌های اقتصادی، با کاهش میزان تولید گازهای گلخانه‌ای به حفظ محیط زیست و توسعه پایدار نیز یاری رساند. برای تعیین و امکان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ۵ واریانت مختلف مطرح گردید.

بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ و معادلات معرفی شده در بخش روش تحقیق، می‌توان با دقت زیادی میزان ارزش گرمایی حاصل از زباله‌های جامد شهر مشهد را صرفا از طریق سوزاندن و با استفاده از معادله‌ی ۳ به دست آورد. نکته بسیار مهم آن است که چنین منبعی پایان‌ناپذیر و با حداقل پیامدهای زیست محیطی است. به هر حال، با توجه به آمار زباله تولیدی در شهر مشهد و ضرایب تبدیل، می‌توان عنوان داشت که این میزان برای مشهد ۲۱۶ کیلوکالری خواهد بود. بر اساس معادله‌ی ۵، میزان انتشار CO_2 از زباله‌های سوزانده شده ۰/۰۵۹ تن و بر اساس معادله‌ی ۴ انتشار CH_4 نیز در حد ۰/۰۰۶ تن پیش‌بینی می‌شود. به عبارت دیگر، جرم گاز منتشره در مجموع برابر با ۰/۱۳ تن خواهد بود. محاسبات دقیق نشان می‌دهد که حدود ۵۵ درصد از گاز متان منتشره مربوط به ذخیره‌گاه‌هایی خواهد بود که به منظور تولید گاز تعبیه شده‌اند. البته، طبق برآوردهای انجام شده، انرژی بالقوه ناشی از گاز متان به دست آمده از زباله‌های دفن-شده به شکل انرژی الکتریکی حدود ۰/۰۴۵ مگاوات ساعت خواهد بود. این میزان تولید برق با سرمایه‌گذاری در حدود ۰/۴۵ میلیارد تومانی قابل وصول است و مدت زمان استهلاک در این روند نیز کمتر از ۵ سال خواهد بود(جدول ۴).

برای تولید انرژی از زباله روش‌های مختلفی چون احتراق مستقیم، گازیفیکاسیون، پرولیز و پلاسما مطرح می‌باشد که در این بررسی از سیستم پلاسما که دارای بالاترین راندمان است، استفاده شده‌است. نتایج تحلیل روش‌های تولید انرژی از زباله که برای مطالعه‌ی موردی از سال ۱۳۹۵ تا سال ۱۴۲۵، با استفاده از مدل بحث شده در بخش قبل، انجام گرفته در جداول ۳ تا ۵ نشان داده شده‌است. مطابق این اطلاعات، همان‌طور که تولید زباله از ۰/۷۵ میلیون تن به ۱/۶۱ میلیون تن از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۲۵، افزایش می‌یابد، انتشار گازهای گلخانه‌ای از زباله‌های جامد شهری امحا نشده، به تدریج از ۰/۸۵ میلیون تن کربن دی‌اکسید به ۱/۷۸ میلیون تن افزایش پیدا می‌کند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

مطابق معادله‌ی ۴، زباله‌های تولیدی در شهر مشهد در حال حاضر، ۰/۶۰ تن کربن دی‌اکسید، تولید می‌کنند که این مقدار در سال ۱۴۰۵ به ۱/۰۹۲ میلیون تن، در سال ۱۴۱۵ به ۱/۳۱ میلیون تن و در سال ۱۴۲۵به ۱/۷۸ میلیون تن کربن دی‌اکسید خواهد رسید. با توجه به نرخ افزایش تولید زباله‌های جامد شهری، افزایش مستقیم انتشار گازهای گلخانه‌ای قابل تصور خواهد بود.

جدول ۳. مقدار تولید زباله و گازهای گلخانه‌ای منتشره با توجه به زباله‌های تولیدی در مشهد

سال	مقدار زباله تولیدی(میلیون تن در سال)	گازهای گلخانه‌ای(GHG) (میلیون تن گاز کربن دی اکسید در سال)
۱۳۹۵	۰/۷۶	۰/۸۵
۱۳۹۷	۰/۷۹	۰/۸۸
۱۴۰۱	۰/۸۸	۰/۹۸
۱۴۰۵	۰/۹۸	۱/۰۹
۱۴۱۵	۱/۱۸	۱/۳۱
۱۴۲۵	۱/۶۱	۱/۷۸
۱۳۹۵	۰/۷۶	۰/۸۵
۱۳۹۷	۰/۷۹	۰/۸۸
۱۴۰۱	۰/۸۸	۰/۹۸
۱۴۰۵	۰/۹۸	۱/۰۹

مأخذ: یافته‌های تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۴. انرژی تولید شده بر اساس روش امحا(GWh/y)

شرح	انرژی حاصل از گاز	انرژی حاصل از سوزاندن زباله
۱۳۹۵	۲۸۸	۳۶۰
۱۳۹۷	۳۰۰	۳۷۲
۱۴۰۱	۳۴۸	۴۵۶
۱۴۰۵	۳۷۲	۴۸۰
۱۴۱۵	۴۵۶	۵۸۸
۱۴۲۵	۶۰۰	۷۸۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۵. هزینه‌های تولید گاز

	استحصال گاز از زباله			تولید انرژی به روش سوزاندن	
سال	**برق**	**هزینه‌ها**	**حجم کربن**	**برق**	هزینه‌ها	حجم کربن
۱۳۹۵	۱۲۵	۸۷	۰	۱۸	۱۴	۰
۱۳۹۷	۱۳۴	۹۲	۰	۲۳	۱۵	۰
۱۴۰۱	۱۴۸	۱۰۱	۰	۲۸	۱۶	۰
۱۴۱۵	۱۶۶	۱۱۵	۰/۱۲	۴۲	۱۷	۰/۱۲
۱۴۲۰	۲۰۳	۱۴۳	۱	۵۱	۱۸	۱
۱۴۲۵	۳۰۰	۲۰۳	۹	۶۹	۲۳	۹

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۴، پتانسیل تولید انرژی بر اساس استراتژی‌های بازیافت را برای یک دوره‌ی ۲۰ ساله نشان می‌دهد. انرژی زباله‌های شهری را می‌توان به وسیله‌ی بازیافت یا سوزاندن گاز زباله‌ی دفن شده بازیابی نمود. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده‌است، تولید برق از زباله‌های جامد شهری دفن شده و زباله‌های سوزانده شده، از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۲۵، با افزایش منابع زباله، افزایش می‌یابد. در مقایسه‌ی سوزاندن زباله‌ها و بازیابی گاز زباله‌ی دفن شده، سوزاندن منابع، تولید برق بیشتری را به دنبال دارد. تحلیل اقتصادی برای فروش برق، واحدهای کربنی و هزینه‌ی هر دو استراتژی زباله برای انرژی در جدول ۵، نشان داده شده‌است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

با توجه به آن چه بیان شد می‌توان گفت که تولید بیشتر برق ناشی از سوزاندن زباله‌های شهری، فروش برق بیشتر و مطالبه‌ی واحدهای کربنی برای جلوگیری از انتشار کربن دی اکسید افزون‌تری را در پی دارد. به عنوان مثال، با توجه به زباله تولیدی، امکان کسب ۱۰/۵۶ میلیون تومان درآمد از فروش برق و مطالبه‌ی واحدهای کربنی ناشی از سوزاندن زباله، وجود دارد. این در حالی است که سودهای مشابه برای بازیابی گاز زباله‌ی دفن شده، تنها ۱/۳۲ میلیون تومان است. اما، مطابق محاسبات صورت‌گرفته، سرمایه‌گذاری و صرف هزینه‌های جاری برای هر دو مورد، یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارد.

همان‌طور که در جدول شماره‌ی ۶ نشان داده شده، برای ارزیابی اثر گزینه‌های مصرف برحسب تبدیل انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، حالات متفاوتی قابل تصور است. واریانت شماره‌ی ۱، وضعیت عادی را نشان می‌دهد که در اغلب شهرها و حتی کشورهای مختلف جهان مورد استفاده قرارگرفته و تنها به جمع‌آوری، دفع و دفن زباله محدوده شده و اصولا انرژی از زباله تولیدی حاصل نمی‌شود. در واریانت‌های ۲ تا ۵، شیوه‌های مختلف تبدیل زباله به انرژی مورد توجه قرارگرفته و ضمن اهداف مربوط به بهداشت و نظافت، به بازیافت و تبدیل مواد زائد نیز توجه دارد. به عنوان مثال، در واریانت شماره ۲، تنها به بازیافت گاز از زباله توجه شده‌است. اما در واریانت ۵، توجه اصلی به سوزاندن زباله و اخذ انرژی از زباله به ساده‌ترین و کم هزینه-ترین روش است. در واریانت‌های۳ و ۴، ترکیب یکسانی از بازیابی تولید گاز و سوزاندن مطرح بوده و تنها اولویت‌ها متفاوت است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۶. واریانتهای تبدیل زباله به انرژی

ردیف	واریانت	شرح
۱	واریانت اول	ادامه وضعیت معمول بدون کاربرد روش تبدیل زباله به انرژی
۲	واریانت دوم(بازیافت گاز)	تبدیل زباله به انرژی از طریق بازیافت گاز برای تولید برق
۳	واریانت سوم(گاز/سوزاندان)	راهبرد ادغام روش تبدیل به انرژی(دفن و سوزاندن)، در این صورت نرخ بهره مندی از زباله ۶۴ درصد برای بازیافت گاز و ۳۶ درصد در روش سوزاندن
۴	واریانت چهارم(سوزاندن/بازیافت گاز)	راهبرد ادغام روش تبدیل به انرژی(دفن و سوزاندن) در این صورت نرخ بهره مندی از زباله به صورت سوزاندن ۶۴ درصد و برای بازیافت گاز ۳۶ درصد خواهد بود
۵	واریانت پنجم(سوزاندن)	تبدیل زباله به انرژی از طریق تحلیل حساسیت ها سوزاندن فقط برای تولید انرژی

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در این واریانت‌ها، با توجه به این که چه تجهیزات و تاسیساتی برای تبدیل انرژی وجود دارد، نسبت و نرخ تبدیل زباله به انرژی متفاوت بوده و به همان نسبت نیز هزینه‌ها تغییر خواهد کرد. تحلیل واریانتهای بالقوه برای بازیابی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای برای حالات مختلف در جدول ۷ نشان داده‌شده‌است. انتشار گازهای گلخانه‌ای خالص برای تمامی واریانتها از ۰/۱۲ به ۰/۰۲۴ تن کربن دی‌اکسید، متفاوت‌است. همان‌طورکه انتظار می‌رفت، بدترین واریانت، واریانتی عادی، می‌باشد که گازهای گلخانه‌ای خاص بیشتری را در مقایسه با واریانتهای دیگر در پی دارد. بنابراین، به سیاست‌گذاران توصیه می‌شود، دیگر گزینه‌ها را برای مدیریت زباله‌های شهری مد نظر قرار دهند تا از این طریق، محیط زیست بهتر و بیشتر حفاظت شده و در ضمن سود اقتصادی بالاتری حاصل آید. در نتیجه، می‌توان ادعا نمود که واریانت ۴، در تبدیل زباله به انرژی بسیار عاقلانه‌تر از سایر موارد می‌باشد. زیرا در روش بازیابی گاز از زباله‌ی دفن شده، گازهای گلخانه‌ای بیشتری تولید می‌شود. این در حالی است که سوزاندن زباله، انرژی بالقوه‌ی بیشتری نیز تولید می‌نماید. واریانت ۲ با سیستم بازیابی گاز زباله‌ی دفن شده، به عنوان تنها استراتژی زباله برای انرژی، ۰/۰۴۵ مگاوات ساعت برق و تقریبا ۰/۱۰۶ تن کربن دی‌اکسید از

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

انتشار گازهای گلخانه‌ای خالص، تولید می‌کند. ترکیب سیستم بازیابی گاز زباله دفن‌شده و سوزاندن با میزان ۶۴ درصد و ۳۶ درصد در واریانت ۳ باعث تولید ۰/۰۵۰ مگاوات ساعت برق می‌شود و میزان انتشار کربن خالص را تعدیل می‌نماید. از طرف دیگر، اجرای بهتری در واریانت ۴ در مقایسه با واریانت ۳ بیان شده که در آن سوزاندن زباله به عنوان استراتژی اصلی در تبدیل زباله به انرژی به شمار می‌رود. بهترین واریانت بر حسب انتشار گازهای گلخانه‌ای و انرژی بالقوه تولیدی در واریانت ۵، دیده می‌شود که در این واریانت، سوزاندن زباله به عنوان تنها استراتژی مد نظر است.

جدول ۷. مقایسه پتانسیل بازیابی انرژی و انتشارگازهای گلخانه‌ای برای حالات مختلف

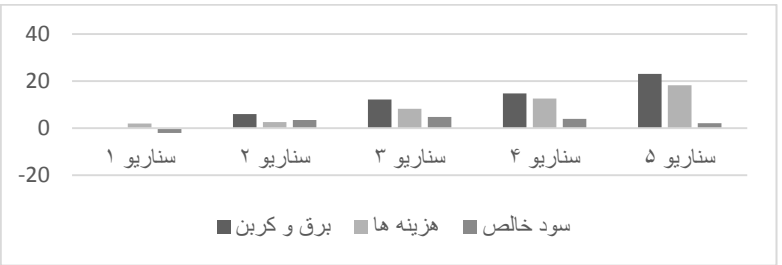
شرح	واریانت ۱	واریانت ۲	واریانت ۳	واریانت ۴	واریانت ۵
گازهای گلخانه‌ای(tCO2e/t)	۰/۱۳۳	۰/۱۰۶	۰/۰۷۶	۰/۰۵۳	۰/۰۲۴
برق تولیدی(MWh/t)	۰	۰/۰۴۵	۰/۰۵۰	۰/۰۵۳	۰/۰۵۸
درصد کاهش آلایندگی	۰	۲۰	۴۳	۶۰	۸۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در ارتباط با هزینه‌های مربوط به هر یک از روش‌ها نیز باید نکاتی را یادآوری نمود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده‌است؛ سود خالص منفی که برای واریانت متداول، انتظار می‌رفت، به عنوان دفن سنتی زباله، هیچ تلاشی برای بازیافت انرژی یا امحای زباله برای تولید واریانت ۵ را انجام نداده که بهترین پتانسیل و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را فراهم می‌سازد. اما، سوزاندن زباله، نیازمند بالاترین هزینه با کمترین سود خالص مثبت ۲۱/۳۰ میلیون است. سودمندترین مورد، توسط واریانت ۳، نشان داده می‌شود که در آن هم گاز زباله‌ی دفن شده (۶۴ درصد) و هم فن‌آوری سوزاندن (۳۴ درصد)، تلفیق شده‌اند و سود خالص ۵۴/۱۰ میلیون ریال را بدست می‌آورد. واریانت ۳ را می‌توان به عنوان مساعدترین واریانت، در نظر گرفت، با اجرای قابل قبول پتانسیل انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و با نتیجه‌ی بهترین سودمندی اقتصادی، با مقایسه‌ی واریانت‌های مختلف زباله برای انرژی، بر حسب پتانسیل انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل اقتصادی،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

بیان شد که استراتژی‌های تبدیل زباله به انرژی، هزینه‌های بالاتری دارند. بنابراین، سیاست‌گذاران، باید مشخص نمایند که کدام هدف برای آنها اصلی و مهم است. تنها در این صورت است که هزینه‌های مادی و غیر مادی را می‌توان هماهنگ نمود. به عنوان مثال، یک راهبرد می‌تواند ارزش ریالی بالاتری را تولید نماید، اما آثار و پیامدهای زیست محیطی آن بسیار زیاد است. بر عکس، در مواردی ظاهرا ارزش اقتصادی کمتری در پی دارد، اما پیامدهای زیست محیطی آن نیز کمتر می باشد. بر این اساس، در ارزیابی هدف نهایی مدیریت در باروری، سودمندی یا حفاظت از محیط زیست، قبل از در نظر گرفتن هر استراتژی، بسیار مهم است.

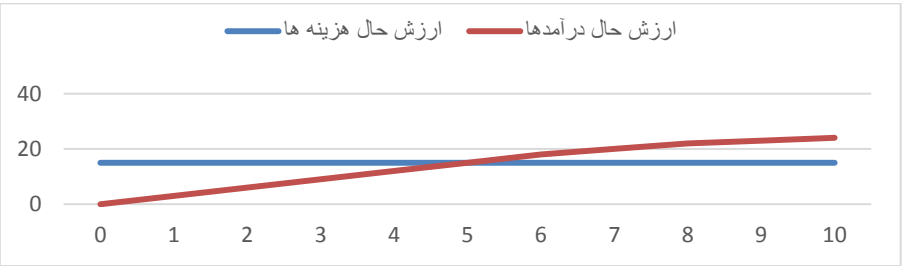


شکل۲. هزینه و درآمد برای روش‌های مختلف

بر این اساس و با توجه به محاسبات صورت گرفته، می‌توان در اولین اقدام، یک نیروگاه ۱۲۰۰ کیلوواتی برای شهر مشهد پیشنهاد نمود تا از این طریق بتواند قریب به ۱۵۰ تن زباله را به صورت روزانه تبدیل نماید. هزینه برآوردی برای راه‌اندازی این تاسیسات حدود ۱۵ میلیارد تومان می‌باشد(این میزان با توجه به تکنولوژی قابل خرید محاسبه شده‌است. در ایران میزان سرمایه‌گذاری از حدود ۲ میلیارد تومان برای ۹۰۰ تن زباله در شیراز برای سال ۱۳۸۶ تا ۳۰ میلیارد تومان برای ۳۰۰ تن زباله و در سال ۱۳۹۳ در تهران متفاوت بوده‌است). البته با توجه به برآوردها، این هزینه در طی کمتر از ۵ سال مستهلک شده و به سوددهی خالص خواهد رسید(شکل ۳). تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که یک نیروگاه ۶۰۰ کیلو واتی تولید برق، با استفاده از ۷۳ تن زباله سرمایه‌گذاری اولیه حدود ۵۰ میلیارد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ریالی، در سناریو بدبینانه تا پایان عمر مفید ۱۵ ساله نیروگاه، بیش از ۳۰ میلیارد ریال سود به دست‌می-دهد(رحیمی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۶۳).



شکل۳. زمان مستهلک شدن سرمایه‌گذاری پروژه

برای محاسبات مربوط به تحلیل هزینه در این بررسی، از نرم افزار کامفار استفاده شد. خروجی این نرم افزار، جداول و نمودارهای بسیار زیادی است که در اینجا به بیان آنالیز حساسیت (IRR) و توضیح پارامترهای مهم به صورت خلاصه با در نظر گرفتن نرخ مالیات مرسوم در چنین پروژه‌هایی پرداخته شده‌است. همچنین با توجه به این که با افزایش قیمت‌ها، درآمدها نیز به همان نسبت بالا می-رود؛ لذا، لحاظ کردن نرخ تورم در محاسبات ضرورتی نداشت.

آنالیز حساسیت، در واقع نوع بازنگری به یک ارزیابی اقتصادی است. با این سوال که آیا پس از انجام پروژه، تخمین‌های اولیه می‌توانند به خوبی نمایانگر شرایطی باشند که در آینده پیش خواهد آمد و بر طرح اثر خواهند گذاشت و یا خیر؟ هدف از آنالیز حساسیت کمک به تصمیم گیرندگان طرح در شرایطی به غیر از شرایط در نظر گرفته شده می‌باشد. بنابراین، برای تصمیم-گیری نهایی باید یک یا تعدادی از عوامل بحرانی‌تر را در نظر گرفت و نتیجه تغییرات آن عوامل را بررسی نمود. به طور خلاصه، آنالیز حساسیت عبارت است از تکرار محاسبات یک فرایند با تغییر دادن پارامترهای اصلی و مقایسه نتایج به دست‌آمده با نتایج حاصل از اطلاعات اولیه. اگر تغییر کوچکی در یک پارامتر، منجر به تغییر چشم‌گیری در نتایج گردد، گفته می‌شود که طرح، نسبت به آن پارامتر حساسیت دارد و آن پارامتر حساس است. در جدول شماره ۸ آنالیز حساسیت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

به وسیله پارامتر نرخ بازده داخلی(IRR) بر مبنای تغییرات قیمت فروش محصول، تغییرات سرمایه‌گذاری ثابت و هزینه‌های عملیاتی ارائه شده‌است. به عنوان مثال، با کاهش ۴ درصد از درآمد فروش، میزان IRR به ۲۰/۹۳ درصد می‌رسد. همین‌طور با ۴ درصد کاهش در دارایی‌های ثابت و هزینه عملیاتی، نرخ بازده داخلی به ترتیب به ۲۳/۱۳ درصد و ۲۲/۷۸ درصد خواهد رسید. لازم به ذکر است نرخ بازده داخلی در حالت محاسبه ۲۲/۲۸ درصد می‌باشد.

جدول ۸. میزان حساسیت IRR

تغییرات	درآمد فروش	افزایش در دارایی های ثابت	هزینه عملیاتی
-۲۰	۱۵/۳۶	۲۷/۲۲	۲۴/۷۸
-۱۶	۱۶/۷۹	۲۶/۰۷	۲۴/۲۸
-۱۲	۱۸/۱۹	۲۵/۰۲	۲۳/۷۸
-۸	۱۹/۵۷	۲۴/۰۳	۲۳/۲۸
-۴	۲۰/۹۳	۲۳/۱۳	۲۲/۷۸
۰	۲۲/۲۸	۲۲/۲۸	۲۲/۲۸

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج ارائه شده در جدول ۹ نشان‌دهنده آن است که با گذشت سال‌های تولید، میزان نسبت سود خالص به کل فروش در حال افزایش است. این امر نشان دهنده کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سود در طی سال‌های تولید می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول ۹. سود خالص به کل فروش

نسبت سود خالص به فروش	سال	نسبت سود خالص به فروش	سال
-۲/۴۵	۳	۱۳/۰۹	۴
۲۶/۳۷	۵	۳۷/۴۷	۶
۳۱/۳۱	۷	۳۵/۰۱	۸
۳۵/۹۹	۹	۳۵/۹۹	۱۰
۳۵/۹۹	۱۱	۳۵/۹۹	۱۲
۵۰/۰۳	۱۳	۵۰/۰۳	۱۴
۵۰/۰۳	۱۵	۵۰/۰۳	۱۶
۵۰/۰۳	۱۷	۵۰/۰۳	۱۸
۵۰/۰۳	۱۹	۵۰/۰۳	۲۰
۵۰/۰۳	۲۱	۵۰/۰۳	۲۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در جدول ۱۰ نیز کاهش NPV با افزایش نرخ تنزیل ارائه شده‌است. نرخ بازده داخلی، نرخ تنزیلی است که به ازای آن ارزش حال خالص یا NPV صفر می‌گردد و IRR این طرح ۲۲/۲۸ درصد می‌باشد.

جدول ۱۰. ارزش حال خالص NPV به کل حجم سرمایه‌گذاری

خالص ارزش فعلی	نرخ تنزیل	خالص ارزش فعلی	نرخ تنزیل
۲۳۴۸۹۸	۰	۵۵۹۰۵	۱۰
۵۸۰۲	۲۰	-۱۲۸۰۱	۳۰
-۲۱۲۵۸۲	۴۰	-۲۵۳۹۲	۵۰
-۲۷۵۰۶	۶۰	-۲۸۵۶۳	۷۰
-۲۹۰۳۳	۸۰	-۲۹۱۲۷	۹۰
-۲۹۷۵۸	۱۰۰		

مأخذ: یافته‌های تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

۵. نتیجه‌گیری

تقاضای رو به افزایش برای انرژی و فراوانی زباله‌های جامد شهری، ضرورت مد نظر قرار دادن استراتژی ملی بهرمندی از زباله برای تولید انرژی را مطرح ساخته‌است. هم اکنون، تولید گاز از زباله‌های دفن شده در برخی از جوامع مطرح شده و در کشور ما هم قابلیت اجرا دارد و ضمن تولید انرژی، می‌تواند انتشار برخی از گازهای خطرناک را هم به حداقل ممکن کاهش دهد. این شرایط وقتی اهمیت پیدا می‌کند که بدانیم هم اکنون، ۴۹ درصد کل گاز متان منتشر شده در ایران، در محل دفن زباله‌های شهری تولید و در هوا پراکنده می‌شود(Saberifar et al., 2015). این شرایط در بررسی‌های دیگر نیز مورد تایید قرار گرفته است که از آنجمله می‌توان به بررسی رحیمی و همکاران (۱۳۹۰)، با عنوان بررسی فنی و اقتصادی تولید برق و انرژی از بیوگاز زباله شهری در رباط کریم، اشاره نمود.

در این پژوهش، انتخاب فن‌آوری زباله برای انرژی، به وسیله‌ی محاسبات بر اساس خصوصیات زباله‌ها و میزان تولید آن و پتانسیل زباله برای تولید انرژی به منظور سبک‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای در وضعیت ممکن از نظر اقتصادی نشان داده‌شد. یک تحلیل مفصل در مورد گاز زباله‌ی دفن شده و سوزانده شده بر حسب تولید برق بالقوه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و سودهای اقتصادی، بر اساس مدل تبدیل انرژی، ارائه گردید.

این مطالعه همچنین ۵ واریانت برای کسب انرژی از زباله، سیستم بازیابی گاز زباله‌ی دفن شده و فن‌آوری‌های سوزاندن زباله را مورد بررسی قرارداد. محاسبات نشان داد که واریانت ۵ که سیستم بازیابی گاز زباله‌ی دفن شده و سوزاندن زباله‌ها را تلفیق می‌کرد، جایگاه بهتری در بین سایرین به خود اختصاص می‌دهد. این واریانت به دلیل تولید بیشترین سود خالص و کاهش حداکثری انتشار گازهای گلخانه‌ای خالص بالقوه، شانس بیشتری از نظر اجرایی دارد. این یافته با بررسی زی و همکاران(۲۰۱۴) که نشان‌دادند ترکیب بازیابی گازهای حاصل از زباله‌های دفن شدن و سوزاندان زباله، بهترین راندمان را برای تولید برق به همراه دارد، هماهنگ می‌باشد. نتایج بررسی‌های صورت گرفته در ایران نیز تا حدودی با این یافته‌ها همراستا می‌باشد(امین‌صالحی و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

همکاران، ۱۳۹۷: ۱۲۳). در نهایت مشخص گردید که پیش امحای زباله‌های جامد شهری، برای بالا بردن بازیابی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به وسیله‌ی استراتژی‌های زباله برای انرژی ضروری می‌باشد. به‌هرحال، در صورتی که امکان دفن کل زباله شهر مشهد فراهم‌آید، مقدار برق تولیدی ۷۶۸۰۰۰۰ کیلووات ساعت خواهد بود که به همان نسبت نیز هزینه سرمایه-گذاری افزوده خواهد شد. البته اگر قیمت خرید توسط کشورهای خارجی و در حدود ۱۸۰ دلار را مد نظر قرار دهیم، می‌توان گفت که با این تولید، اداره شهر مشهد، بدون اتکا به عوارض و سایر وصولی‌های شهرداری از مردم، ممکن می‌گردد.

به طورکلی، تامین برق در برخی از روش‌های متداول کنونی، از تامین برق از طریق زباله‌های شهری، صرفه اقتصادی بیشتری دارد، لیکن این روش، در کاهش آلاینده‌های مختلف، بسیار اثرگذار است. به همین دلیل، در قوانین موضوعه و قوانین مربوط به بودجه سالیانه در مجلس، بر تولید و تامین انرژی از منابع پاک، تاکید شده و سالیانه مبالغی به عنوان سوبسید به نهادهای مسئول در این ارتباط پرداخت می‌شود. این در حالی است که به موجب ماده ۵ قانون حمایت از صنعت برق مصوب ۱۳۹۴، به دولت اجازه داده شده‌است تا بخشی از منابع لازم جهت اجرای طرح‌های توسعه و نگهداری و تولید برق تجدیدپذیر و پاک را از شیوه‌های قانونی دیگر تامین و در اختیار دستگاه‌های مسئول قرار دهد.

علاوه بر آن، مطابق اصل سازگاری، با توجه به تغییر در نیازهای عمومی که منجر به تغییر در منافع عمومی می‌شود، خدمات عمومی نیز باید به تناسب این تغییرات، دگرگون و خود را سازگار نمایند. بر این اساس، از آنجا که در شرایط حاضر، تولید زباله و مشکلات ناشی از آن، به یکی از دلمشغولی‌های اساسی شهروندان تبدیل شده‌است، ظاهرا تولید برق از زباله‌های شهری، عاقلانه‌ترین راهکار به نظر می‌رسد و دولت ناچار است به مسئولیت خود در این راستا عمل نماید. به همین دلیل، ضرورت دارد تا با گسترش این نوع فعالیت‌ها، نسبت به کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا اقدام کرد. علاوه بر مزایای مورد اشاره، با سیاستگذاری موثر در ارتباط با تولید برق از زباله‌های شهری، ضمن توسعه دانش بومی و آشنایی با فن‌آوری‌های روز

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

دنیا، کشور ایران پیشگام تولید در این ارتباط در منطقه خواهد شد و قادر است با صدرو تکنولوژی بومی شده، بخشی از هزینه‌های اضافی را پوشش دهد.

٦. پیشنهادات

با توجه به هزینه‌بر بودن جمع‌آوری و دفع زباله‌های شهری، تولید برق از زباله‌های موجود، ضمن کاهش بار اقتصادی شهرداری، به درآمدهای پایدار این نهاد هم کمک خواهد کرد.
با مطالعات تکمیلی، سایر زمینه‌های بهره‌مندی اقتصادی از زباله‌ها نیز در دستور کار قرارگیرد.
به جهت اهمیت کاهش گازهای آلاینده و شیرابه‌های مضر زباله‌های تولیدی، به جای تاکید بر درآمدهای مادی، بر کاهش آلاینده‌ها تمرکز گردد.

با وجود آن که بهره‌مندی از زباله برای تولید انرژی منافع متعددی به همراه دارد، با این وجود، به سیاست‌گذاران توصیه می‌شود، دیگر گزینه‌ها را برای مدیریت زباله‌های شهری مد نظر قرار دهند تا از این طریق، محیط زیست بهتر و بیشتر حفاظت شده و در ضمن سود اقتصادی بالاتری حاصل آید.

تقدیر و تشکر

نویسنده از سرکار خانم دکتر مینا جامی‌الاحمدی(مدرس گروه شیمی دانشگاه فرهنگیان) به جهت انجام و کنترل بخش‌های آزمایشگاهی و جناب آقای مهندس صادقی(روابط عمومی سازمان مپ) برای کنترل آمار و اطلاعات مقاله با منابع و تحقیقات موجود در سازمان بازیافت پسماند شهرداری مشهد، تقدیر و تشکر می‌نماید.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

منابع

استادزاد، علی(۱۳۹۲)، «پیش‌بینی بلندمدت سهم بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر از کل انرژی در قالب یک الگوی رشد پایدار: مورد ایران(۱۳۸۷-۱۴۲۰)»، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۲۸-۲.

امین‌صالحی، فرناز؛ نوروز، عارف و کامبیز رضاپور (۱۳۹۷)، «اولویت‌بندی فناوری‌های تبدیل پسماند شهری به سوخت زیستی در ایران»، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۴، شماره ۱۳، صص ۱۵۹-۱۲۳.

جلیلوند، مهدی؛ زندیان، فرشاد و عبدالحمید پاپ‌زن (۱۳۹۱)، «مدیریت پسماند و تولید انرژی پاک در استان کرمانشاه»، همدان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان.

دانش، شهناز؛ یزدانبخش، محمد؛ حسیندخت، محمدرضا و جواد عابدینی (۱۳۸۵)، بررسی خصوصیات شیرابه زباله‌های شهری، مطالعه موردی زباله‌های شهر مشهد، دانشگاه فردوسی.

رحیمی، عبدالرحیم؛ ثقفی، مجید و سمیه شیرازی (۱۳۹۰)، «بررسی فنی و اقتصادی تولید برق و انرژی از بیوگاز زباله شهری در رباط کریم»، مدیریت شهری، صص ۱۸۵-۱۶۳.

رضاپور، فاطمه (۱۳۹۳)، «زباله انرژی است»، ماهنامه صنعت و توسعه، شماره ۹۳، صص ۱۲۱-۱۱۹.

قائدی‌راد، مجتبی و آرش شاهین (۱۳۹۵)، تحلیل چشم‌انداز توسعه تکنولوژی‌های انرژی خورشیدی در ایران به روش تلفیقی از SWOT و DEMATEL»، فصلنامه پژوهش‌های سیاست-گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۲، شماره ۵، صص ۱۳۰-۹۷.

قلی‌زاده، شهرزاد و محمد رحیم رهنما (۱۳۹۴)، «ظرفیت تحمل زیست محیطی و تراکم توسعه پایدار شهری در منطقه ۹ شهرداری مشهد»، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۶۰، صص ۲۶۳-۲۸۶.

مجلسی، منیره؛ زمانی، امان اله؛ مهدی‌پور، فیاض؛ شمسایی، وجیهه؛ شریفی ملکسری، هاجر و پوریا درروار (۱۳۹۲)، «تجزیه و تحلیل هزینه جمع‌آوری و حمل و نقل پسماند منطقه ۱ شهر بندرعباس»، فصلنامه بهداشت در عرصه، دوره ۱، شماره ۱، صص ۴۷-۳۷.

ملکوتی، محمد جواد (۱۳۷۸)، «کشاورزی پایدار و افزایش عملکرد با بهینه‌سازی مصرف کود در ایران»، نشر آموزش کشاورزی، شماره ۱، صص ۴۱-۳۸.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

مهربانی، محمد مهدی؛ شیبانی، سحر و علی صداقت‌پور (۱۳۹۲)، «بررسی روش‌های استفاده مجدد از پسماند و بازیافت انرژی»، تهران، دانشگاه تهران.

نصیری، جواد(۱۳۸۶)، «بررسی و مقایسه فناوری‌های تولید برق از پسماندهای جامد شهری، سومین همایش ملی مدیریت پسماند»، تهران، سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور و سازمان حفاظت محیط زیست.

نعمتی، جواد؛ فرهادیان، نگین؛ صفایی، مریم و پوریا مجیدی (۱۳۹۳)، «بازیابی انرژی از زباله‌ها»، تهران، مهراروند.

Almeida, M., and Ferreira, M. (2017). Cost effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56), Malaysia: Energy and Buildings.

Howar, B. S., Hamilton, N. E., Diesendorf, M., and Wiedman, T. (2018). "Modeling the carbon budget of the Australian electricity sector's transition to renewable energy", Renewable Energy, No. 125, pp. 712-728.

Jeswani, H.K., and Azapagic, A. (2016). "Assessing the environmental sustainability of energy recovery from municipal solid waste in the UK", Waste Management, No. 50, pp. 346-363.

Johri R., Rajeshwari, K. and Mullick A. (2011). Technological option for municipal solid waste management. In: Wealth from Waste: Trends and Technologies, New Dehli: The Energy and Research Institute.

Kalantarifard. A., and Go, SY. (2011). "Energy potential from municipal solid waste in Tanjung Langsat landfill", Johor, Malaysia. Int J Eng Sci Technol, Vol. 3. No. 12, pp. 8560–8.

Noor. Z. Z., Yusuf, RO., Abba, AH., Abu Hassan, MA., and Mohd Din, MF. (2013). "An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario", Renew Sustain Energy, No. 20, pp. 378–84.

Oh TH., Pang S., and Chua SC. (2010). ''Energy policy and alternative energy in Malaysia: Issues and challenges for sustainable growth", Renew Sustain Energy Rev, No. 14, pp. 1241–52.

Saberifar, R., Sadeghihesar, H., Safarian, M., and Ghabol, R. (2015). "Locating Exchange Stations of Dry Municipal Solid Waste in Urban Areas Case study: City of Mashhad", Indian Journal of Natural Sciences, No. 6, pp. 41-49.

Sie, T., Hashim, H., and Shiun, J. (2014). Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia, Malaysia: Jinyue Yan.

Tchnobanoglous G., Theisen H., Vigil SA. (1993). Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues, London: McGraw-Hill.

Yip, C. and Chua, K. (2008). "An overview on the feasibility of harvesting landfill gas from MSW to recover energy", ICCBT, No. 4, pp. 303-10.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]